بهینه‌سازی فنی اقتصادی مجموعه روسازی آسفالتی و اساس تثبیت‌شدهٔ مطالعهٔ موردی محور اردکان-نائین* پژوهشی

مصطفی آدرسی[1]

چکیده هدف مطالعهٔ حاضر تعیین درصد مناسب تراشهٔ آسفالت و سیمان در مخلوط‌های اساس تثبیت شده با سیمان است به‌گونه‌ای که عامل دوام و اقتصادی بودن روسازی، هم‌زمان درنظر گرفته شوند. ازاین‌رو مقاومت فشاری و کششی در درصدهای مختلف RAP شامل ۰٪، ۴۰٪، ۶۰٪ و ۸۰٪ و در درصدهای مختلف سیمان شامل ۳٪، ۵٪ و ۷٪ به‌دست آورده شد. درادامه روسازی تحت بار استاندارد ۱۰، ۲۰، ۳۵ و ۵۰ میلیون ESALs تعیین ضخامت شد. با برقراری رابطه بین درصد تراشهٔ آسفالت، درصد سیمان، عدد شاخص حساسیت رطوبتی (TSR) به‌عنوان یک پارامتر مؤثر در دوام، و هزینه‌ی اجرای روســازی در بارهای مختلف، معادلهٔ هم‌زمان هزینهٔ دوام روســازی تشــکیل گردید. نهایتا براساس تکنیک بهینه‌سازی میزان درصد بهینهٔ تراشهٔ آسفالت و سیمان در مخلوط‌ها به‌منظور دست‌یابی به دوام مورد انتظار (TSR= ۷۰) تعیین گردید. بر این اساس جواب بهینهٔ تابع هزینه که تابعی از سطح بارگذاری است، در مقدار ۲۹٫۶ درصد تراشهٔ آسفالت، ۴٫۱۶ درصد سیمان و در حداقل سطح بارگذاری حاصل شد. از نتایج مقالهٔ فوق می‌توان با تقریب مناسبی در طرح سازه‌ای روسازی بادوام و اقتصادی حاوی اساس تثبیت‌شده با سیمان و مقادیر مختلف تراشهٔ آسفالت بهره برد.

واژه‌های کلیدی تراشهٔ آسفالت، مقاومت فشاری، مقاومت کششی، دوام مخلوط، طرح اقتصادی.

Economic and Durability Optimization of Asphalt Pavement with Cement Stabilized Base Mixtures Ardakan-Naeen Case Study

M. Adresi

Abstract *The purpose of this study is to determine the appropriate percentage of RAP and cement in the stabilized base in such a way that the durability and economics of the pavement are considered simultaneously. Therefore, compressive and tensile strength was obtained in different percentages of RAP including 0%, 40%, 60%, and 80%, and indifferent percentages of cement including 3%, 5%, and 7%. The structural design of the Pavement was further determined under 10, 20, 35, and 50 million ESALs. By establishing the relationship between the percentages of RAP, percentage of cement, and moisture sensitivity index (TSR) as an effective parameter in durability, and the cost of paving at different loads, a simultaneous cost-durability equation of pavement was formed. Finally, based on the optimization technique, the optimal percentage of RAP and cement to achieve the expected durability (TSR = 70) was determined. Hence, the optimum cost, which is a function of the loading level, was obtained in the amount of 29.6% of RAP, 4.16% of cement, and in the minimum loading level. The results can be appropriately approximated in the design of durable and economical pavement structures Contains a stabilized base with cement and various amounts of RAP.*

Key Word RAP, Compressive strength, Tensile strength, mixed durability, Economical structural mix design.

* تاریخ دریافت مقاله ۱۳۹۹/۷/۱۲تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۰/۶/۸و از صفحه ۱۷ تا ۳۴ می‌باشد.

(۱) نویسندهٔ مسئول، استادیار دانشکدهٔ مهندسی عمران دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی.

Email: M.adresi@sru.ac.ir

مقدمه

یکی از مهم‌ترین موضوعات مورد توجه مهندسان راه، طرح ضخامت روسازی‌های حاوی تراشۀ آسفالت بازیافتی می‌باشد. این طرح ضخامت براساس درصد تراشۀ آسفالتی موجود در قشر روسازی می‌تواند گامی مهم در اقتصادی‌بودن طرح روسازی باشد. به‌منظور اقتصادی‌بودن و انتخاب درصد مناسب تراشۀ آسفالتی موجود در مخلوط باید به دو نکته یعنی هزینۀ اجرا و برآورده نمودن حداقل دوام مورد انتظار مخلوط اساس تثبیت‌شده توجه داشت. یکی از کاربردهای مهم استفاده از تراشۀ آسفالتی، استفاده از آن در قشر اساس می‌باشد که می‌تواند به‌طور قابل‌توجهی موجب کاهش استفاده از مصالح طبیعی شود و هم‌چنین باتوجه به دارا بودن قشر نازک قیر اطراف سنگدانه‌های بازیافتی و افزایش ضریب اصطکاک درونی مصالح لایۀ اساس و هم‌چنین اتصال ضعیف قیر با مصالح اطراف خود، به نوعی مقاومت لایۀ اساس حاوی تراشۀ آسفالت افزایش می‌یابد و درنتیجه از ضخامت قشر رویۀ آسفالتی کاسته می‌شود. این موضوع خصوصا باتوجه به رشد روزافزون قیمت قیر امری بسیار مهم تلقی می‌گردد. از جمله عوامل مؤثر در طرح ضخامت روسازی شامل قشر اساس تثبیت‌شده با سیمان، توجه به خصوصیات مقاومتی قشر اساس تثبیت‌شده با سیمان می‌باشد. از جمله مهم‌ترین خصوصیات مقاومتی که در قشر اساس تثبیت‌شده با سیمان مدنظر است، مقاومت فشاری و کششی مخلوط‌های فوق می‌باشد. طاها و همکاران به بررسی تأثیر تراشۀ آسفالت از صفر درصد تا ۱۰۰ درصد در کیفیت لایه‌های اساس و زیر اساس پرداختند. آنها دریافتند که با افزایش تراشۀ آسفالت به مخلوط‌های اساس و زیر اساس تثبیت‌شده، چگالی خشک مخلوط به‌صورت خطی کاهش می‌یابد. هم‌چنین با بررسی CBR دریافتند که در لایۀ زیر اساس با افزایش ۱۰۰ درصدی تراشۀ آسفالت به‌عنوان سنگدانه‌های لایۀ زیر اساس، باز هم حداقل CBR مورد نظر قابل تأمین هست [1]. این مقدار برای لایۀ اساس به ۱۰ درصد استفاده از تراشۀ آسفالت برای رسیدن به CBR ۸۰ درصد محدود شد. هم‌چنین در تحقیق دیگری با اضافه کردن CKD (Cement kiln dust) به اساس حاوی تراشۀ آسفالت به این نتیجه رسید که تا ۱۰۰ درصد تراشۀ آسفالت می‌توان به مخلوط اساس اضافه کرد [2]. با این کار هزینۀ لایۀ اساس به‌شدت کاهش خواهد یافت [3] و لایۀ اساس جدید از تراوایی بیشتری نسبت‌به لایۀ اساس متداول بدون تراشۀ آسفالت برخوردار است [4]. آدرسی و همکاران در یک تحقیق با بررسی رفتار اساس تثبیت‌شده با مقادیر متفاوت سیمان حاوی مقادیر متفاوت تراشۀ آسفالت و درنظر گرفتن اثرات دما و رطوبت بر رفتار مکانیکی مخلوط‌های تثبیت‌شده دریافتند که با افزایش تراشۀ آسفالت چگالی خشک مخلوط به‌صورت خطی کاهش می‌یابد. هم‌چنین مطالعات نشان داد که با افزایش درصد تراشۀ آسفالت در مخلوط با شرایط بحرانی مرطوب ۲۵ درجۀ سانتی‌گراد و خشک ۵۰ درجۀ سانتی‌گراد، مقاومت فشاری محدود نمی‌شود و مقاومت کششی غیرمستقیم مخلوط‌های تثبیت‌شده کاهش می‌یابد [5], [6]. لینگ‌یونگ و همکاران با اضافه کردن اساس ماکادمی بازیافتی که با سیمان تثبیت شده بود برای ساخت آسفالت گرم دریافتند که برای بهبود مقاومت در برابر رطوبت، از پرکننده‌های سیمان و آهک هیدراته می‌توان به‌طور مؤثری استفاده کرد. آنها ترکیب ۱٫۷۵٪ وزن سیمان/ آهک هیدراته (۱: ۱) را برای رسیدن به بهترین عملکرد مقاومت در برابر رطوبت پیشنهاد دادند [7]. علم و همکاران در تحقیقی سعی کردند خواص مکانیکی مخلوط‌های اساس با درصدهای مختلف تراشۀ آسفالت از قبیل مدول برجهندگی این مخلوط‌ها را مورد بررسی قرار دهند. آنها دریافتند که با افزایش درصد تراشۀ آسفالت در لایۀ اساس، مدول برجهندگی لایۀ اساس افزایش می‌یابد و درنتیجه استحکام لایۀ زیرین لایۀ آسفالتی ارتقا می‌یابد و از ضخامت لایۀ آسفالتی می‌کاهد [8]. مسعود فرامرزی و همکاران اشاره دارند که روسازی‌های آسفالتی یا بتنی که از لایۀ اساس تثبیت‌شده

با سیمان حاوی تراشهٔ آسفالت استفاده کرده‌اند دارای ترک‌های انعکاسی ناشی از تردشدگی لایهٔ اساس تثبیت‌شده هستند. آنها با پیشنهاد مخلوط اساس تثبیتی جدید حاوی تراشهٔ آسفالت، سیمان، قیر امولسیونی، اکرولیک پلیمر توانستند به عملکرد بهتری در این حوزه دست یابند و ترک‌های انعکاسی را تا حدود زیادی کنترل کنند [10] ,[9]. در تحقیقی دیگر مهتا و همکاران قطعات مختلف روسازی آسفالتی را که لایهٔ اساس آن توسط روش‌های مختلف به‌سازی عمقی تثبیت شده بود و توسط چسباننده‌های مختلف از قبیل قیر امولسیون، سیمان، CaCL2 و ژئوتکستایل به‌همراه تراشهٔ آسفالت اصلاح شده بود، مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که روسازی آسفالتی شامل لایهٔ اساس تثبیت‌شده با سیمان حاوی تراشهٔ آسفالت نسبت‌به دیگر روش‌های تثبیت دربرابر ترک‌های خستگی مقاومت بیشتری از خود نشان می‌دهد [11]. ماهر و همکاران متوجه شدند که مصالح RAP نسبت‌به مصالح دانه‌ای از مدول برجهندگی و مدول الاستیک میدانی بیشتری برخوردارند [12]. طاها رمزی و همکاران اثر مقادیر متفاوت سیمان و تراشهٔ آسفالت را روی ضخامت روسازی بدون درنظر گرفتن اثرات دوامی و هم‌چنین مسائل اقتصادی طرح روسازی نهایی‌شده، بررسی کردند آنها به این نتیجه رسیدند که در تمام مخلوط‌های اساس حاوی تراشهٔ آسفالت بدون استفاده از سیمان، با افزوده شدن مقادیر تراشهٔ آسفالت در مقایسه با اساس ساخته شده با ۱۰۰درصد مصالح طبیعی، ضخامت لایهٔ رویه افزایش می‌یابد. این به‌دلیل ضعف بیشتر لایهٔ حاوی تراشهٔ آسفالت در مقایسه با لایهٔ بدون تراشهٔ آسفالت است. آنها به این نتیجه رسیدند که هرچه مقادیر تراشهٔ آسفالت کمتر باشد و مقادیر سیمان بیشتر باشد، از ضخامت لایهٔ رویه و اساس تثبیت‌شده کاسته خواهد شد. هم‌چنین بر خلاف لایه تثبیت‌نشده که ضخامت لایهٔ رویه بیشتر از اساس تثبیت‌نشده است، با تثبیت لایهٔ اساس ضخامت لایهٔ رویه کمتر از ضخامت لایهٔ اساس تثبیت‌شده می‌شود بدین مضمون که نقش باربری از لایهٔ رویه به لایهٔ اساس تثبیت‌شده تغییر می‌کند [12].

تحقیقات زیادی برروی مخلوط های اساس تثبیت‌شده با سیمان حاوی مقادیر متفاوت تراشهٔ آسفالت به‌منظور تعیین مقدار بهینهٔ سیمان و تراشهٔ آسفالت براساس معیار مقاومت فشاری محدودنشدهٔ مجاز این‌گونه مخلوط‌ها و تأثیر آن بر عملکرد کل روسازی انجام شده‌است که همگی مقدار ۳ الی ۵ درصد سیمان را پیشنهاد نموده‌اند [13] ,[12] ,[6]. محدودهٔ مجاز مقاومت فشاری محدودنشده بین ۳۰۰ الی ۵۰۰ psi در بین مراجع مختلف پیشنهاد شده‌است [14]. بر این اساس حداکثر ۵۰۰ psi به‌منظور کنترل صلبیت لایهٔ تثبیت شده و جلوگیری از بروز ترک در لایهٔ تثبیت شده و کاهش ریسک ترک انعکاسی در لایهٔ رویه تعیین شده است.

طبق نظر مؤسسهٔ به‌سازی و بازیافت آسفالت ARRA (Asphalt Recycling and Reclaiming Association)، حداقل TSR برای مخلوط‌های آسفالتی به‌روش باز یافت سرد (cold recycled asphalt mixtures) CRAM باید ۰٫۷۰ باشد، با این حال ممکن است به ۰٫۶۰ کاهش یابد. هم‌چنین ARRA اظهار داشت که حداقل قدرت ITS CRAM در ۲۵ درجهٔ سانتی‌گراد باید ۳۱۰ کیلو پاسکال باشد [15].

ایار [16] با بررسی جامع مخلوط‌های تثبیت‌شده با قیر امولسیونی این‌طور جمع‌بندی کرد که استفاده از سیمان پوزولانی حاوی مخلوط‌های بازیافتی حاوی امولسیون قیری (RMBE (Recycled Mixture with Bitumen Emulsion) در مقایسه با سیمان پرتلند حاوی RMBE رفتار خستگی بالاتری دارد. چند سال بعد، نتایج مشابهی توسط اجوم گزارش شد که بااستفاده از سیمان تا ۳٪ می‌تواند مقاومت خستگی RMBE را بهبود بخشد در حالی که سطح کرنش کمتر از ۲۰۰ میکرون باشد. اگرچه نتایج این مطالعات نشان داد که به‌طور کلی افزودن سیمان به RMBE می‌تواند باعث کاهش عمر خستگی در جاده‌های پرترافیک شود. باید

توجه داشت که سطح کرنش RMBE که اغلب به‌عنوان یک لایهٔ زیرین در سیستم‌های روسازی استفاده می‌شود به‌ندرت از ۲۰۰ میکرون عبور می‌کند. بنابراین، استفاده از سیمان (تا ۳٪) به‌عنوان مادهٔ افزودنی در RMBE می‌تواند عمر خستگی را افزایش دهد.

باتوجه به مطالعات گذشته عموم معیارهای مورد پذیرش برای طرح سازه‌ای روسازی حاوی اساس تثبیت‌شده، براساس مقادیر و محدودهٔ مجاز مقاومت فشاری محدودنشده استوار می‌باشد. نکته‌ای که در این‌جا باید بدان توجه کرد مطالعات محدودی است که به بررسی مسئلهٔ دوام و تأثیر آن بر طرح اختلاط و تعیین مقدار بهینهٔ تراشهٔ آسفالت و سیمان و هم‌چنین طرح سازه‌ای این‌گونه روسازی‌ها می‌پردازد. نوآوری این تحقیق، تعیین درصد تراشهٔ آسفالت و سیمان بهینهٔ مخلوط‌های اساس تثبیت‌شده با سیمان تحت طیف وسیعی از بارگذاری ترافیک و با در نظر گرفتن دو دیدگاه دوام مخلوط و هزینه‌ی اجرای به‌صورت توأمان است.

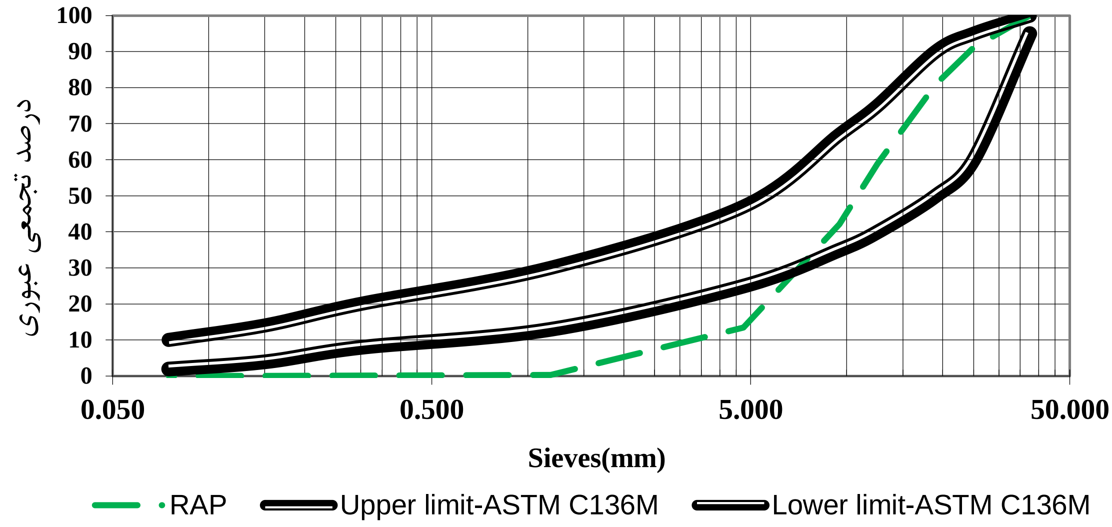
روش انجام آزمایش و مواد و مصالح مصرفی

تراشهٔ آسفالت مورد استفاده در این تحقیق از مصالح تراش داده‌شدهٔ واقع در محور اردکان- عقدا در استان یزد تهیه گردید. محور فوق یکی از پرترددترین محورهای مواصلاتی بین شهری است و از اهمیت بالایی برخوردار است. به‌دلیل اهمیت زیاد و خرابی نسبتا قابل توجه محور، لازم دیده شد تا محور فوق با تثبیت قشر اساس و سپس آسفالت برروی آن بازسازی شود. بررسی‌های انجام‌شده براساس آزمایش احیای قیر (آزمایش اکستراکشن به‌روش دستی) [17] روی چند نمونهٔ خرده آسفالتی نشان داد که به‌طور متوسط، میزان قیر مربوط به این تراشهٔ آسفالت برابر با ٤,٥٪ و سختی قیر پسماند در حدود ۳۰ دهم میلی‌متر براساس استاندارد [18] نفوذ سوزن تعیین شد. دانسیتهٔ مصالح تراشهٔ آسفالتی ۲٥٤۰ کیلوگرم بر متر مکعب و جذب آب آن در حدود ۰,٤ درصد براساس استاندارد [19] تعیین شد.

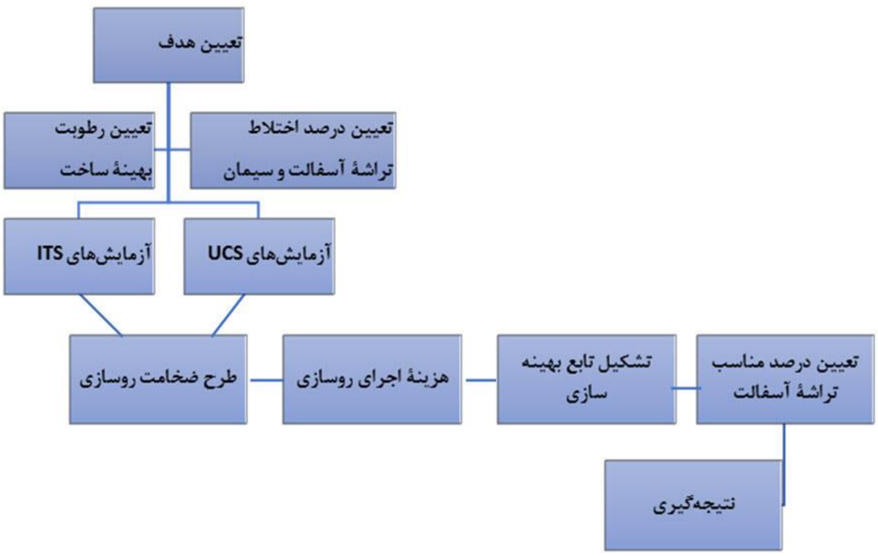
هم‌چنین نمودار دانه‌بندی مصالح تراشهٔ آسفالت براساس استاندارد [20] در شکل (۱) نشان داده شده است. در این نمودار محدودهٔ مجاز دانه‌بندی براساس استاندارد [19] نشان داده شده‌است.

در این مقاله ابتدا با درنظر گرفتن مخلوط‌های حاوی مقادیر مختلف تراشهٔ آسفالت شامل ۰٪، ٤۰٪، ٦۰٪ و ۸۰٪ و هم‌چنین مقادیر مختلف ۳٪، ٥٪ و ۷٪ سیمان اقدام به ساخت مخلوط‌های اساس تثبیت‌شده با سیمان شد. بدین ترتیب با درنظر گرفتن متغیرهای موردنظر، ۱۲ نوع طرح اختلاط مورد توجه است. به‌منظور تهیهٔ نمونه‌های مقاومت فشاری و کشش غیر مستقیم، مخلوط‌های تهیه‌شده در قالب‌های استوانه‌ای به‌قطر ۱۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۲۰ سانتی‌متر در رطوبت بهینه [21] تحت تراکم استاندارد اصلاح‌شده کوبیده شدند. سپس بعد از ۷ روز عمل‌آوری نمونه‌های ساخته‌شده تحت آزمایش‌های مقاومت فشاری [22] و کششی [23] در دو وضعیت خشک و مرطوب قرار گرفتند. با تقسیم نتایج مقاومت کششی غیر مستقیم مرطوب به خشک شاخص نسبت مقاومت کششی (TSR) که بیانگر حساسیت رطوبتی مخلوط تثبیت‌شده است، به‌دست آمد که به‌عنوان مبنایی برای بررسی دوام مخلوط‌های تثبیت‌شده مورد نظر است [24] ,[6]. در ادامه براساس نتایج مقاومتی به‌دست‌آمده و با بهره‌گیری از رابطهٔ ون‌تیل، اقدام به طرح ضخامت روسازی حاوی قشر اساس تثبیت‌شده با سیمان در بارهای مختلف شد. نهایتا با تشکیل تابع هزینهٔ اجرای هر یک از روسازی‌های فوق، درصد مناسب تراشهٔ آسفالت با درنظر گرفتن دو دیدگاه اقتصادی بودن طرح و برآورده نمودن شاخص دوام مورد انتظار که در این مقاله برابر با ۷۰ لحاظ شد، به‌دست آمد.

فلوچارت روش تحقیق این مقاله را می‌توان در قالب شکل (۲) خلاصه نمود. (آزمایش مقاومت فشاری محدودنشده (UCS (Unconfined compressive strength) و مقاومت کششی غیرمستقیم (Indirect ITS (tensile strength).



شکل ۱ نمودار دانه‌بندی مصالح تراشهٔ آسفالتی و محدودهٔ مجاز دانه‌بندی مصالح اساس حاوی تراشهٔ آسفالت

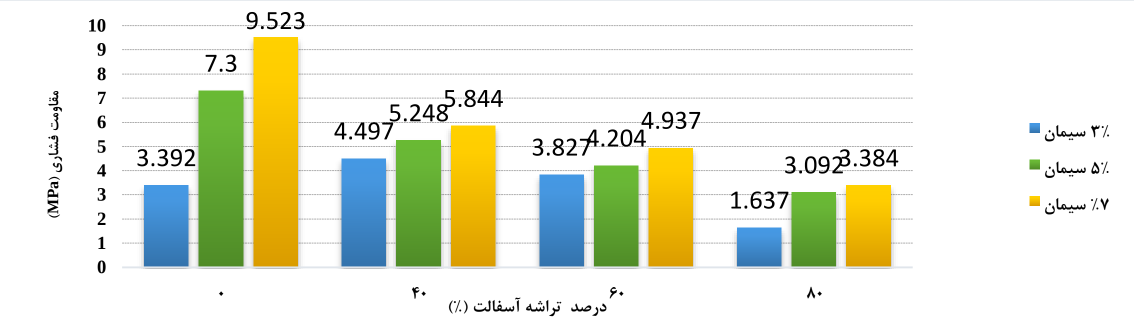


شکل ۲ فلوچارت روش تحقیق مقالهٔ فوق

تحلیل و تفسیر نتایج

نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری

از جمله مهم‌ترین خصوصیات مخلوط‌های اساس تثبیت‌شده با سیمان، مقاومت فشاری ۷ روزهٔ آنها می‌باشد. از نتایج این آزمایش‌ها به‌منظور دست‌یابی به ضریب قشر معادل و مدول برجهندگی قشر فوق دررا ستای طراحی ضخامت رو سازی می‌توان بهره برد. بارگذاری وارده به نمونه‌ها به‌صورت کنترل کرنش بود و سرعت کرنش نمو نه ۱ mm/min تعیین شد. شکل (۳) نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری را نشان می‌دهد.



شکل ۳ تغییرات مقاومت فشاری برحسب درصد تراشهٔ آسفالت

مطابق با نمودار ترسیم شده ملاحظه می‌گردد که با افزایش درصد تراشهٔ آسفالت مقاومت فشاری محدودنشدهٔ نمونه‌ها کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش درصد سیمان مقاومت فشاری محدودنشده، افزایش می‌یابد. این روند با مطالعات انجام‌شدهٔ گذشته هم‌خوانی دارد [6], [14], [24], [25].

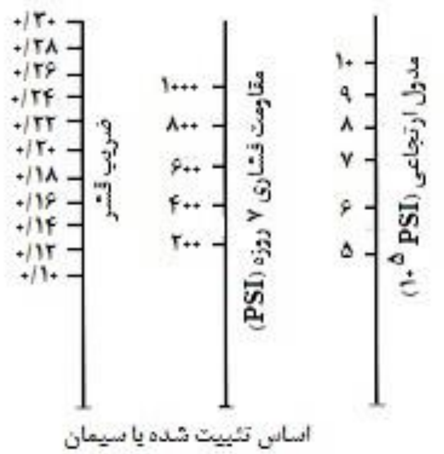
یکی از مهم‌ترین خصوصیات مخلوط‌های حاوی قشر اساس تثبیت شده با سیمان حاوی تراشهٔ آسفالت، مدول ارتجاعی آنها می‌باشد. مطالعات انجام شده نشان داد که قشرهای اساس حاوی تراشهٔ آسفالت مدول ارتجاعی بالاتری دارند. از دیگر خصوصیات روسازی حاوی درصد تراشهٔ آسفالتی، تأثیر این مواد در تغییرات ضریب قشر لایهٔ شامل تراشهٔ آسفالتی می‌باشد که مستقیما تأثیر به‌سزایی در ضخامت به‌دست‌آمدهٔ روسازی دارد. براساس نتایج مطالعاتی توسط ون‌تیل، می‌توان رابطهٔ مناسبی بین مقاومت فشاری ۷ روزهٔ قشر اساس تثبیت شده با سیمان با مدول ارتجاعی و ضریب قشر اساس، بیان نمود [26]. شکل (٤) نمودار ون‌تیل قشر اساس تثبیت‌شده با سیمان را نشان می‌دهد.

براساس نتایج مطالعات آزمایشگاهی انجام شده که در نمودار شکل (۳) بیان شد، می‌توان یک رابطهٔ مناسب بین مقاومت فشاری محدودنشدهٔ مخلوط، درصد تراشهٔ آسفالتی و سیمان به‌شرح معادلهٔ (۱) بیان نمود.

$$UCS = 4.350 - 0.062 * Rap + 0.583 * Cement \quad (1)$$

که در معادلهٔ فوق UCS مقاومت فشاری تک‌محوری مخلوط‌ها برحسب (MPa)، Rap درصد تراشهٔ آسفالتی موجود در مخلوط‌ها و Cement درصد سیمان موجود در مخلوط‌ها می‌باشد.

با بهره‌گیری از معادلهٔ (۱) و رابطه نموداری ارائه‌شده توسط ون‌تیل به‌سادگی می‌توان مدول ارتجاعی و ضریب قشر معادل اساس تثبیت شده با سیمان حاوی مقادیر متفاوت تراشهٔ آسفالت را به‌دست آورد و نهایتا به طرح ضخامت لایه‌های مختلف روسازی پرداخت.



شکل ٤ رابطهٔ بین مقاومت فشاری با ضریب قشر و مدول ارتجاعی [27]

نتایج آزمایش‌های مقاومت کششی غیرمستقیم

از دیگر خصوصیات مهم لایه‌های تثبیت شده با سیمان مقاومت کششی غیرمستقیم و دوام آنها می‌باشد. در این مقاله به‌منظور بررسی مقاومت کششی غیرمستقیم مخلوط‌ها، اقدام به ساخت نمونه‌های استوانه‌ای به‌منظور بررسی این خصوصیت گردید. از تقسیم مقاومت کششی غیرمستقیم و ضعیت مرطوب نسبت‌به خشک می‌توان به شاخص نسبی دوام مخلوط ها (TSR) دست‌یافت. با ضرب نمودن عدد فوق در ۱۰۰، عدد دوام مخلوط اساس تثبیت‌شده با سیمان به‌دست می‌آید. این عدد، دوام قشر اساس تثبیت‌شده با سیمان را دربرابر نفوذ آب به مخلوط و کاهش چسبندگی بین چسب که در این‌جا فیلم قیر و ملات سیمان با سنگدانهٔ تحت افزایش فشار آب حفره‌ای در فرایند آزمایش می‌باشد، نشان می‌دهد. مراجع مختلف نظرات متفاوتی در رابطه با حد عدد دوام قشر تثبیت‌شده با سیمان دارند که عموما این آستانهٔ دوام بین ۵۰ تا ۷۰ تغییر می‌کند. در این مقاله آستانهٔ عدد دوام قشر اساس تثبیت‌شده با سیمان برابر با ۷۰ درنظر گرفته شده است [24], [28], [30].

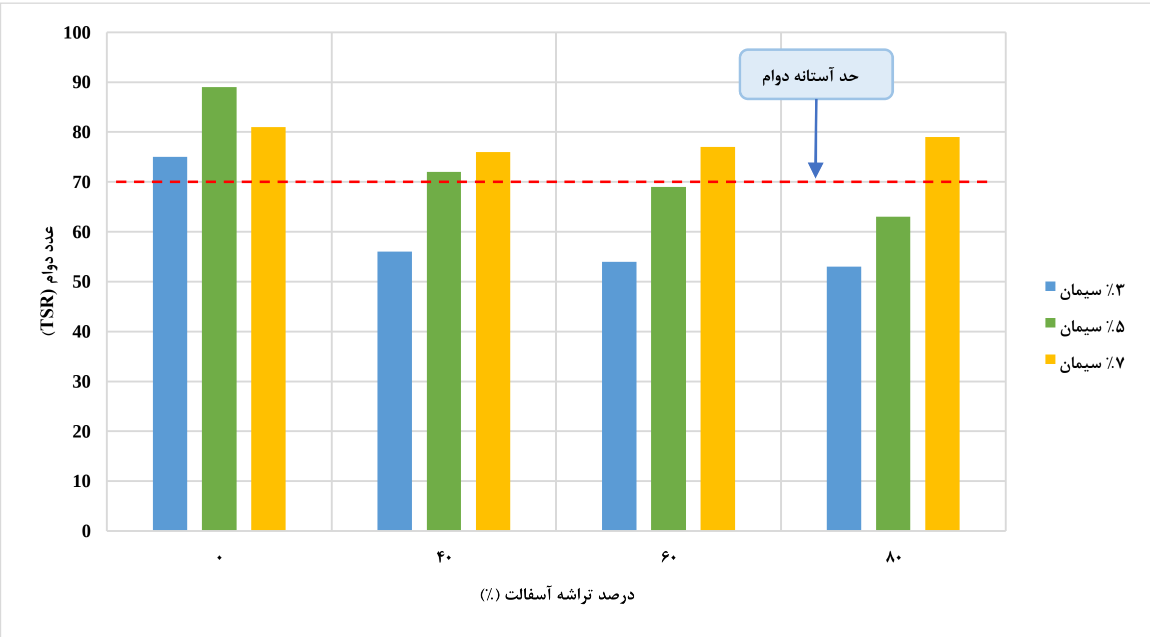
با درنظر گرفتن نتایج آزمایش‌های مقاومت کششی غیرمستقیم و تعیین پارامتر TSR می‌توان به معادلهٔ دوام به‌شرح معادلهٔ (۲) دست یافت.

$$TSR = 47.49 - 1.116 * Cement^2 + 0.0033 * Rap^2 + 13.029 * Cement - 0.769 * RAP + 0.061 * RAP * Cement \quad (۲)$$

که در معادلهٔ فوق TSR عدد دوام (مثلا ۷۰)، Cement درصد سیمان موجود در مخلوط، Rap درصد تراشهٔ آسفالت موجود در مخلوط است.

با در نظر گرفتن آستانه دوام برابر با ۷۰ و ترسیم نمودار عدد دوام مخلوط های مختلف در شکل (۵) خواهیم داشت.

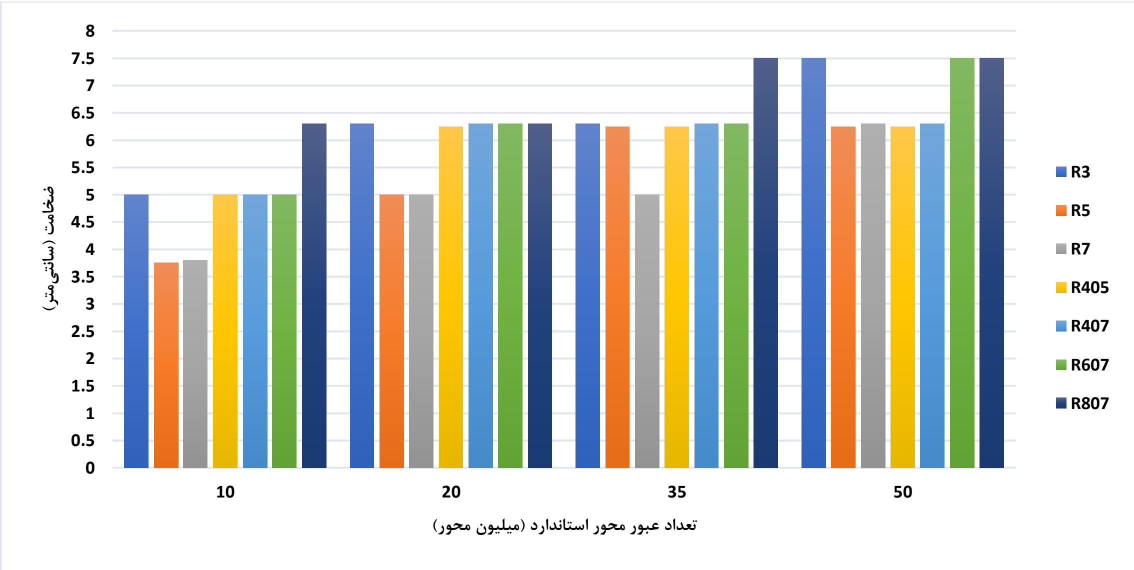
همان‌طور که مشاهده می‌شود بین مخلوط‌های مختلف فقط کدهای R3, R5, R7, R405, R407, R607, R607 و R807 معیار دوام را برآورده می‌کنند.



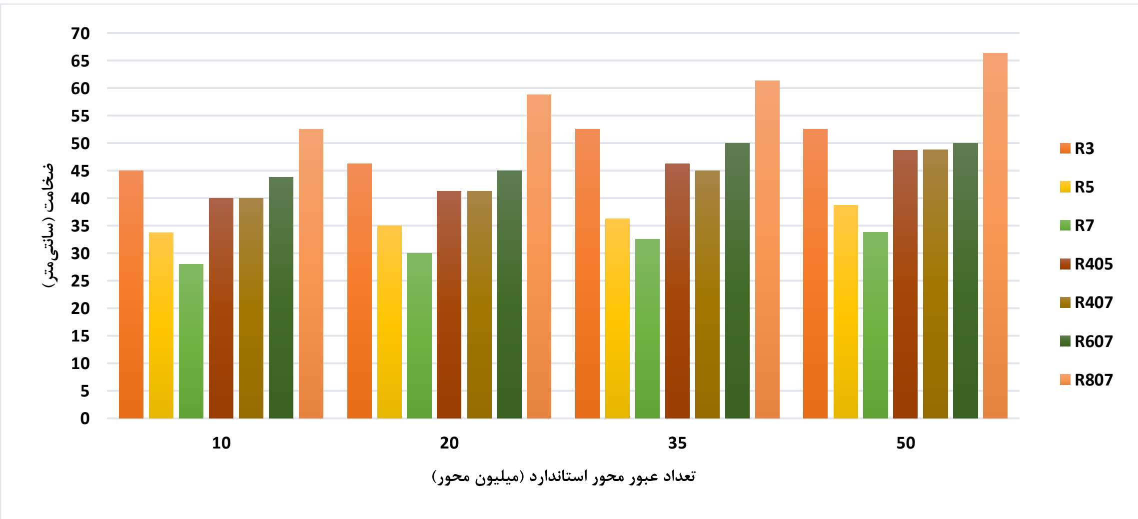
شکل ۵ تغییرات عدد دوام و بررسی مخلوط‌های باکیفیت ازلحاظ دوام

طراحی روسازی‌های اساس تثبیت‌شده

در این بخش براساس نتایج آزمایش های دوام و مخلوط هایی که الزام عدد دوام را رعایت می‌کردند، اقدام به طرح روسازی‌ها گردید. طرح روسازی‌ها براساس رابطهٔ آشتو و با درنظر گرفتن معیار حداقل ضخامت هر قشر به‌منظور انتقال بار به لایه‌های زیرین انجام گرفت [26]. شکل‌های (٦) و (٧) به‌ترتیب نتایج طرح ضخامت قشر رویه، قشر اساس تثبیت‌شده با سیمان را نشان می‌دهند. قابل‌ذکر است که ضخامت قشر زیراساس براساس رعایت الزام حداقل ۱۵ سانتی‌متر نشریه ۲۳٤ برابر با مقدار زیر در نظر گرفته شد .[27]



شکل ٦ تغییرات ضخامت قشر رویه برحسب تعداد محور عبوری



شکل ۷ تغییرات ضخامت قشر اساس تثبیت‌شده با سیمان برحسب تعداد محور عبوری

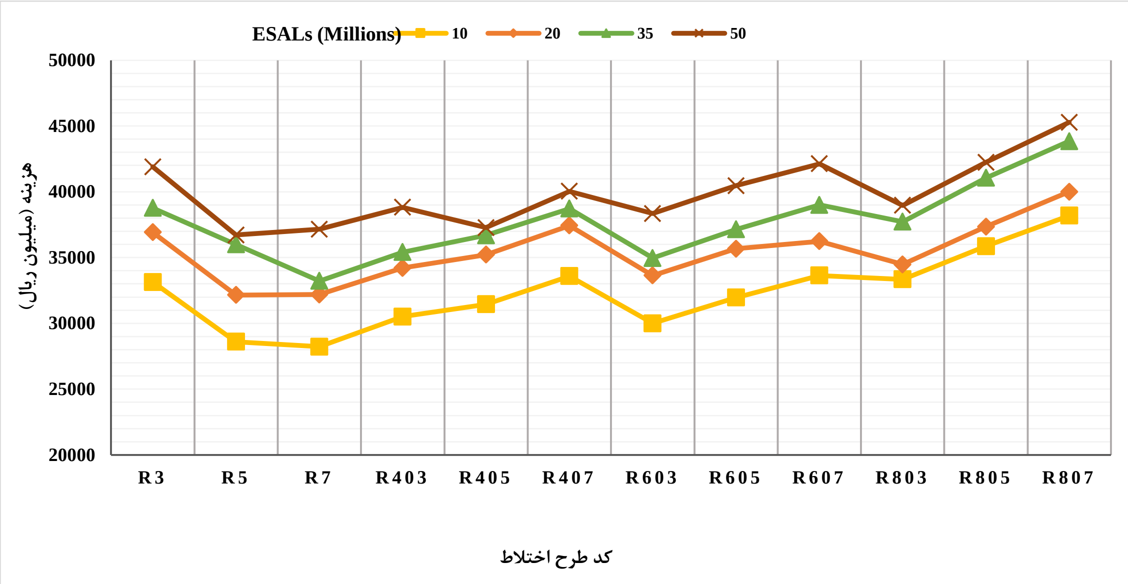
مطابق با نمودارهای ترسیم‌شده می‌توان فهمید، به‌طورکلی مخلوط‌های با کد R5 ،R3 و R7 نسبت‌به سایر مخلوط‌ها دارای ضخامت قشر رویه و اساس کمتری هستند. دلیل این موضوع عبارت است از این‌که، زمانی‌که قشر اساس تثبیت شده با سیمان در صد تراشهٔ آسفالت بیشتری داشته باشد، ضریب قشر آن کمتر می‌شود و به‌موازات آن، ضخامت قشرهای فوق نیز کاهش می‌یابد. درواقع مطابق با رابطهٔ ون‌تیل هرچه مدول ارتجاعی و ضریب قشر لایهٔ اساس بیشتر باشد، به ضخامت کمتر رویه برای انتقال بار ترافیکی به لایه‌های زیرین نیاز داریم. از ضخامت‌های طراحی‌شدهٔ فوق به‌منظور تعیین هزینهٔ هر یک از روسازی‌های طرح شده و نهایتا تشکیل تابع هزینه و به‌دست آوردن مقدار بهینهٔ تراشهٔ آسفالت و سیمان در مخلوط استفاده می‌شود.

آنالیز هزینهٔ روسازی‌های طرح‌شده

در این بخش براساس نتایج طرح ضخامت روسازی‌ها، اقدام به تشکیل تابع هزینهٔ روسازی‌ها می‌گردد. در این راستا ابتدا براساس روسازی‌های طرح‌شده و با بهره‌گیری از فهرست‌بهای راه و باند ۱۳۹۳، که در زمان ساخت این محور فهرست‌بهای پایهٔ پیمان بوده‌است، اقدام به متره و برآورد هزینه‌های ساخت راه به‌عرض ۵٫۵ متر (یک خط و شانهٔ مجاورش) و طول ۱۰ کیلومتر می‌گردد که در شکل (۸) نشان داده شده‌است. بدیهی است براساس ضرایب پیمان می‌توان هزینهٔ اجرا را در زمان‌های مختلف دیگر با دانستن ضریب پیمان پایه محاسبه نمود. برای محاسبهٔ هزینهٔ اجرای روسازی مواردی از قبیل، تراشه لایهٔ مضمحل‌شدهٔ موجود، دانه‌بندی مصالح تراشهٔ آسفالت، اضافه نمودن مصالح اساس با فاصلهٔ حمل ٤٠ کیلومتر، مخلوط مصالح اساس و تراشهٔ آسفالت به نسبت‌های (۰٪، ٤٠٪، ٦٠٪ و ۸۰٪) در درصدهای مختلف سیمان (۳٪، ۵٪ و ۷٪) با فاصلهٔ حمل ۱۲۰ کیلومتر براساس میزان آب بهینه با فاصلهٔ حمل ٤٠ کیلومتر توسط مخلوط‌کن KMA در محل پروژه و حمل به محل اجرا به فاصلهٔ ۱۰ کیلومتر و اجرا و پخش توسط فینیشر و کوبیدگی تا ۹۷٪ تراکم استاندارد اصلاح‌شده به ضخامت به‌دست‌آمده در شکل (۷) (ضخامت هر لایه حداکثر ۲۰ سانتی‌متر درنظر گرفته شد و ضخامت‌های بیشتر در چند لایه محاسبهٔ هزینه شد) و عمل‌آوری تا ۷ روز با آب و کاترزنی به فواصل ۵ متر از هم و پخش آسفالت براساس نتایج به‌دست‌آمده در شکل (٦) به فاصلهٔ حمل ٤٠ کیلومتر مفروض است. این پژوهش براساس این فرضیات پایه‌ریزی شده‌است.

از آن‌جا که هدف از این پژوهش بررسی اثر میزان تراشهٔ آسفالت و سیمان بر هزینهٔ اجریا مخلوط‌های اساس تثبیت‌شده با احتساب شاخص دوام می‌باشد که در معادلهٔ (۵) فرمول‌بندی شد، هزینهٔ بقیه پارامترها در قالب مقدار ثابت در مدل هزینه وارد شده‌است. بدیهی است که باتوجه به زمان و مکان اجرا، تابع هزینه متفاوت خواهد بود.

در ادامه براساس هزینه‌های طراحی، تابع هزینه به‌صورت تابعی از درصد سیمان و درصد تراشهٔ آسفالت تشکیل‌شده و نهایتا بااستفاده از تکنیک بهینه‌سازی، مقدار درصد مناسب تراشهٔ آسفالت براساس هر دو دیدگاه دوام و هزینه به‌دست می‌آید. شکل (۸) هزینهٔ اجرای روسازی حاوی مقادیر مختلف تراشهٔ آسفالت و سیمان تحت تردد بارهای محوری مختلف شامل ۱۰ میلیون محور الی ۵۰ میلیون محور استاندارد عبوری بدون توجه به مسئلهٔ دوام را نشان می‌دهد. در نمودار شکل (۸) دوازده نوع طرح اختلاط شامل چهار متغیر درصد تراشهٔ آسفالت (۰٪، ٤٠٪، ٦٠٪ و ۸۰٪) و سه متغیر درصد سیمان (۳٪، ۵٪ و ۷٪) در نظر گرفته‌شده‌است. کدبندی مخلوط‌های نمودار شکل (۸) مشابه با کدبندی نمودار شکل‌های (٦) و (۷) می‌باشد. برای مثال R605 به‌معنای مخلوط حاوی ٦٠٪ تراشهٔ آسفالت و ۵٪ سیمان است.



شکل ٨ هزینه‌ی اجرای روسازی با اساس تثبیت‌شده با سیمان حاوی تراشهٔ آسفالت در تردد بارمحوری مختلف

با استفاده از نتایج هزینهٔ روسازی درج شده در شکل (٨)، می‌توان به تابع هزینه برحسب درصد تراشهٔ آسفالت و درصد سیمان و مقدار بارگذاری محور استاندارد در طول عمر طرح به فرم معادلهٔ (٤) و (٥) و (٦) مطابق زیر دست‌یافت. همان‌طور که مشاهده می‌شود بهترین خوبی برازش در مربع درصد تراشهٔ آسفالت (RAP) و توان اول سیمان (Cement) و ESALs توسط معادلهٔ (٥) تخمین زده می‌شود. از این‌رو این معادله به‌عنوان رابطهٔ منتخب برای تخمین مقدار بهینهٔ تراشهٔ آسفالت و سیمان به‌منظور کمینه نمودن هزینهٔ اجرای لایهٔ تثبیت‌شده مورد استفاده قرار می‌گیرد.

$$Costs = 26756.528 + 49.214 * Rap + 433.910 * Cement + 181.954 * ESALs$$

$R^2_{adj=0.76}$

(٤)

$$Costs = 34267.74 + 1.098 * RAP^2 - 201.00 * Rap + 33.793 * RAP * Cement - 1078.61 * Cement + 191.454 * ESALs$$

$R^2_{adj=0.94}$

(٥)

$$Costs = 35450.62 + 0.0436 * RAP^3 - 3.127 * RAP^2 - 134.41 * RAP - 0.293 * RAP^2 * Cement + 55.622 * RAP * Cement - 1217.93 * Cement + 181.83 * ESALs$$

$R^2_{adj=0.92}$

(٦)

در معادلات فوق، Costs هزینه‌ی اجرای روسازی برحسب میلیون ریال، Rap درصد تراشهٔ آسفالت (مثلا ٨٠) موجود در مخلوط قشر اساس تثبیت‌شده با سیمان، Cement درصد سیمان موجود (مثلا ٧) در مخلوط قشر اساس تثبیت‌شده با سیمان و ESALs تعداد محور استاندارد عبوری از راه مورد نظر برحسب میلیون محور می‌باشد.

شکل (٩) مقادیر هزینه در مقابل مربع مقادیر تراشهٔ آسفالت و توان اول سیمان در مقابل سطوح مختلف بارگذاری را نشان می‌دهد که در بین گزینه‌های دیگر مدل‌سازی، بهترین پوشش و بالاترین خوبی برازش را نشان داد. مطابق با نمودار ترسیم‌شده می‌توان دریافت که روند تغییرات هزینهٔ اجرایی روسازی شامل اساس

تثبیت‌شده با سیمان حاوی مقادیر تراشهٔ آسفالت در تردد بار محوری استاندارد مختلف، شبیه هم می‌باشد. از شکل (۹) می‌توان نتیجه گرفت که مجموعه جواب بهینه (حداقل) هزینهٔ اجرا، تقریبا در محدودهٔ ۳۰ الی ۷۰ درصد تراشهٔ آسفالت به‌همراه ۵ الی ۷ درصد سیمان واقع شده‌است که این مجموعه جواب در شکل (۱۰) نشان داده می‌شود. درصورتی‌که محدودهٔ قابل قبول مخلوط‌های بادوام (TSR بزرگ‌تر مساوی ۷۰) برگرفته از نمودار (۵) را در شکل (۹) (به‌صورت کادر سیاه‌رنگ) ترسیم کنیم خواهیم دید که مجموعه پاسخ روسازی بادوام الزاما بر مجموعه جواب روسازی ارزان منطبق نیست که با رسم این مجموعه جواب در شکل (۱۰) می‌توان مشاهده کرد که این دو مجموعه پاسخ، دارای فصل مشترکی هستند. به‌نظر می‌رسد پاسخ ساخت یک روسازی کم‌هزینه و بادوام در این محدودهٔ پاسخ واقع شده باشد. از آن‌جا که استفادهٔ حداکثری از تراشهٔ آسفالت هزینهٔ حمل و خرید مصالح جدید را کاهش می‌دهد شاید یک پاسخ منطقی استفاده از ۳۰ درصد تراشهٔ آسفالت به‌همراه ٤ درصد سیمان یا به عبارتی کد R304 باشد.

براساس نمودارهای ترسیم شده (۸)، بیشترین هزینهٔ ساخت مربوط به استفاده از مقادیر زیاد تراشهٔ آ سفالت و ا ستفاده از مقادیر زیاد سیمان می‌با شد. این موضوع با تحقیقات طاها هم‌خوانی دارد [12] ,[3]. م‌شخص ا ست که با افزایش ترا شهٔ آ سفالت در مخلوط ا ساس تثبیت شده، مقاومت و ضریب قشر رو سازی نیز کاهش می‌یابد و نیاز به ضخامت بیشتر می‌باشد. از طرفی افزایش سیمان علاوه‌بر افزایش هزینهٔ اجرا از بعد هزینهٔ مصالح مصرفی و هزینهٔ حمل، نشان داد که به‌طور خطی باعث افزایش مقاومت و درنتیجه کاهش ضخامت روسازی نخواهد شد.

باید توجه داشت که نمودار (۱۰) با فرضیاتی ترسیم شده‌است که مجموعه پاسخ براساس این فرضیات معتبر است. درصورتی‌که نیازمند مجموعه جواب جامع‌تری باشیم می‌توانیم با فرمول‌بندی تابع هزینه و استفاده از تکنیک‌های بهینه‌یابی به مجموعه جواب جامع‌تری دست یابیم. به‌منظور یافتن پاسخ بهینه می‌توان معادلات هزینه و دوام را به‌همراه شروط مختلف به یکی از روش‌های متداول غیرخطی بهینه نمود.

برنامه‌سازی غیرخطی (Nonlinea programming) NLP فرایند حل مسئلهٔ بهینه‌سازی است که در آن برخی از محدودیت‌ها یا خود تابع هدف غیرخطی است. این مسئلهٔ بهینه‌سازی، یک سیستم از برابری‌ها و نابرابری‌ها برروی مجموعه‌ای از متغیرهای ناشناختهٔ حقیقی، در یک تابع هدف است که باید کمینه یا بیشینه شود. یکی از روش‌های حل این مسئله استفاده از روش لاگرانژ است. شرایط لازم برای حل مسئله را می‌توان از طریق یافتن نقاط بحرانی تابع لاگرانژ (ماکزیمم‌سازی بدون قید) به‌دست آورد. در این روش یکی از محدودیت‌ها (محدودیت TSR) با تکنیک لاگرانژ به داخل تابع هدف برده می‌شود و مسئله ساده‌تر حل خواهد شد.

همان‌طور که در رابطهٔ (۷) مشخص است می‌توان تابع هزینه را بااستفاده از شروط مطرح‌شده حل نمود و جواب بهینهٔ تابع هزینهٔ متناظر با آن محدودیت‌ها را استخراج نمود. در این رابطه حداقل TSR مورد پذیرش ۷۰ و حداکثر قابل قبول آن ۱۰۰ می‌باشد. هم‌چنین دیگر شروط اضافه‌شده، حدود تغییرات مصالح تراشهٔ آسفالت، سیمان و بارگذاری می‌باشد. در این تحقیق از Solver اکسل برای بهینه نمودن تابع هزینه در رابطهٔ (۷) استفاده شد. به‌منظور استخراج کلیهٔ جواب‌های محتمل دامنهٔ مقدار TSR بزرگ‌تر از توصیهٔ آیین‌نامه‌های مختلف ($70 \le TSR \le 100$) درنظر گرفته شد. اگر TSR را در بین محدودهٔ 50<=TSR<=100 در نظر بگیریم مقادیر پاسخ بهینه تابع هزینه مطابق جدول (۱) محاسبه خواهد شد. در این حالت برای TSR کوچک‌تر از ۵۵ و بزرگ‌تر از ۸۵ تابع هزینه نقطهٔ بهینه‌ای ندارد. براساس جدول (۱) با کاهش محدودیت TSR می‌توان از تراشهٔ آسفالت بیشتر و سیمان کمتری استفاده نمود. باید توجه نمود که روند تغییرات پاسخ کمینه تابع هزینه، خطی نیست و با توان دوم در TSR=٦٥ دارای بیشینه است.

$$\text{Costs} = 34267.74 + 1.098 * \text{RAP}^2 -$$
$$201.00 * \text{Rap} + 33.793 * \text{RAP} * \text{Cement} -$$

$$1078.61 * Cement + 191.454 * ESALs$$

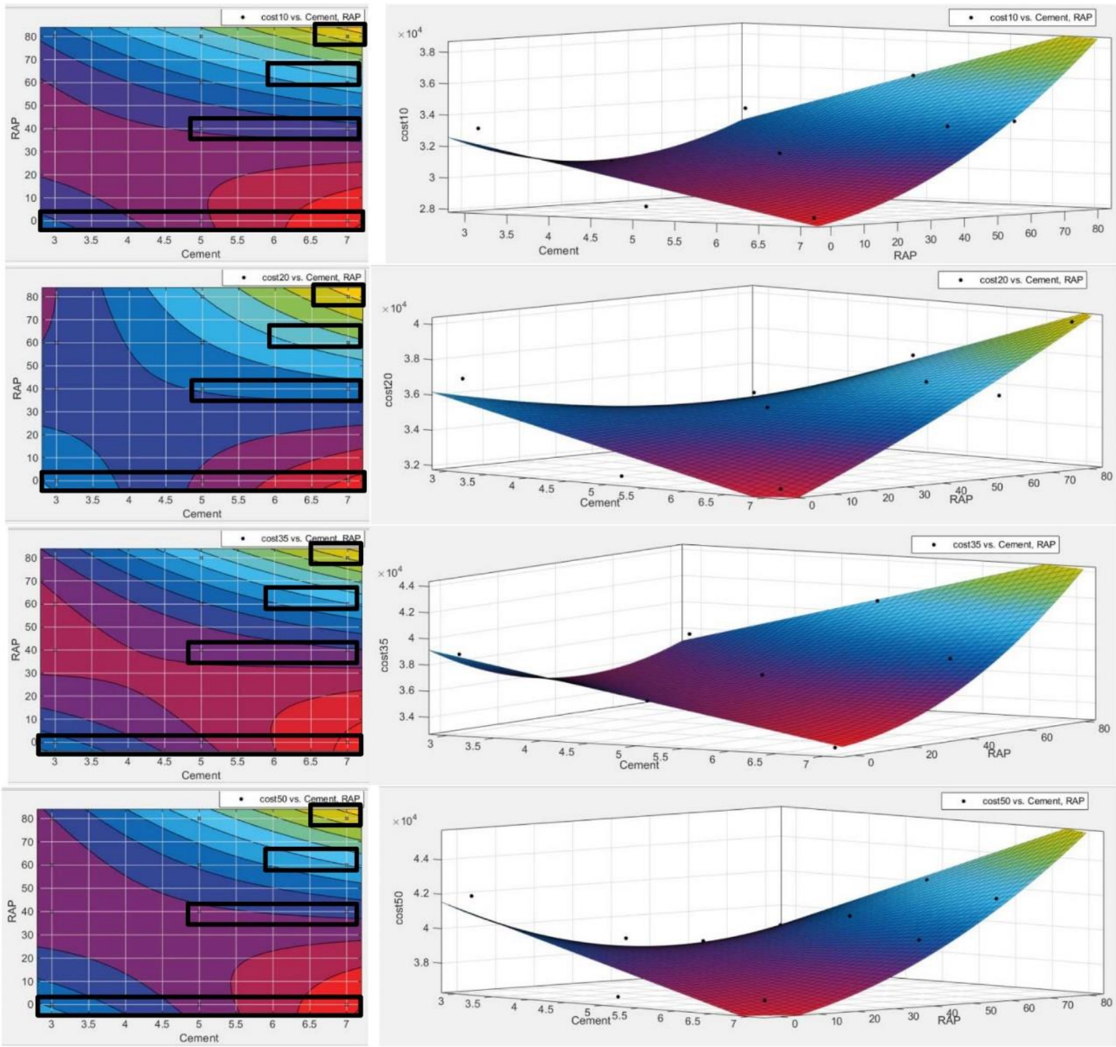
$$TSR = 47.49 - 1.116 * Cement^2 + 0.0033 * Rap^2 + 13.029 * Cement - 0.769 * RAP + 0.061 * RAP * Cement \quad (۷)$$

$$100 \geq TSR \geq 50$$

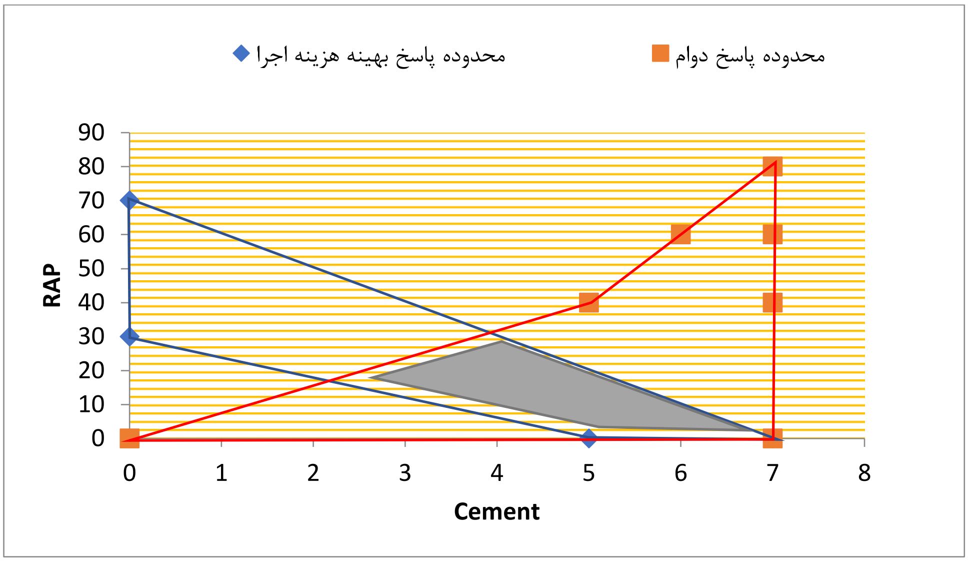
$3 \leq Cement \leq 7$

$0 \leq RAP \leq 80$

$10E6 \leq ESALs \leq 50E6$



شکل ۹ ترسیم رابطه بین هزینهٔ اجرا در مقابل درصد تراشهٔ آسفالت مصرفی و سیمان در سطوح مختلف بارگذاری ۱۰، ۲۰، ۳۵ و ۵۰ میلیون محور استاندارد به‌همراه ترسیم محدودهٔ مخلوط‌های قابل قبول از نظر دوام (کادر مشکی)



شکل ۱۰ مجموعهٔ جواب بهینه (حداقل هزینه) ساخت روسازی بادوام (TSR>70)

جدول ۱ جواب‌های بهینهٔ تابع هزینه از مقادیر متفاوت تراشهٔ آسفالت و سیمان باتوجه به محدودیت‌های TSR

TSR	RAP	Cement	cost
55	51.93498492	3	30,734.21
60	38.93417509	3.149876835	30,767.75
65	34.33919233	3.606159305	30,869.88
70	29.60648301	4.157165515	30,869.07
75	24.89388374	4.933766096	30,687.91
80	15.88964307	6.272153618	29,868.37
85	0	6.518339883	29,151.53

محاسبات نشان داد که جواب بهینهٔ مقادیر RAP و سیمان به‌دست آمده مستقل از سطوح مختلف بارگذاری است؛ یعنی اگر مقدار حداقل بارگذاری را افزایش دهیم فقط تابع هزینه تغییر می‌کند ولی مقدار بهینه RAP و سیمان ثابت می‌ماند. این نکته را می‌توان با بررسی شکل (۹) نیز مشاهده نمود. با مقایسهٔ نتیجهٔ به‌دست‌آمده از فرایند محاسباتی رابطهٔ (۷) و نتیجهٔ به‌دست‌آماده از شکل (۱۰) می‌توان نتیجه گرفت درصورتی‌که حداقل TSR=70 را درنظر بگیریم، درصدهای بهینهٔ مقادیر RAP و سیمان به‌دست‌آمده برای ساخت مخلوط با کد R304 معتبر است. باید توجه داشت که جواب به‌دست‌آمده یکی از جواب‌های قابل قبول از بین مجموعه پاسخ‌های محتمل می‌باشد. درصورتی‌که حدود اولیهٔ مقادیر متغیرهای RAP و سیمان را عوض کنیم قطعا به پاسخ‌های دیگری خواهیم رسید.

نکته‌ای که بعد از بررسی شکل (۸) به‌نظر می‌رسد نشان‌دهندهٔ این است که حداقل هزینهٔ ساخت در بار محور حداقل و در نبود تراشهٔ آسفالت و با صرف سیمان در بازهٔ ۵ الی ۷ درصد حادث خواهد شد. ولی با بررسی جواب‌های بهینهٔ جدول (۱) مشاهده می‌شود درنظر

گرفتن عامل دوام در طرح سازه‌ای روسازی باعث کاهش هزینه و مصرف مقدار محدود (۳۰٪) تراشهٔ آسفالت در TSR=70 درصد خواهد شد. این یافته با یافته‌های پیشین آدرسی و همکاران هم‌خوانی دارد که در سطوح کم مصرف سیمان و استفاده از ۳۰ الی ۴۰ درصد تراشهٔ آسفالت، مقاومت فشاری مخلوط‌های تثبیت‌شده بیشتر از حالتی است که فقط از سیمان استفاده شده‌است و این به‌دلیل اضافه شدن مقاومت چسبندگی قیر به مقاومت چسبندگی سیمان می‌باشد [6].

نتایج نشان داد درصورتی‌که شاخص TSR از ۷۰ به ۸۰ ارتقا یابد مقدار بهینهٔ تابع هزینه تغییری نمی‌کند و فقط مقدار بهینهٔ تراشهٔ آسفالت به ۱۶ درصد کاهش می-یابد و مقدار سیمان تا ۶٫۳ درصد افزایش می‌یابد. از آن‌جا که تابع هزینه به ضخامت روسازی وابسته است و این پارامتر خود به پارامترهایی چون عدد قشر، عدد سازه‌ای و بارگذاری وابسته است. مشاهده می‌شود در این مسئلهٔ خاص تابع هزینه بیشتر به تغییرات بارگذاری حساس می‌باشد و دوام لایهٔ تثبیت‌شده (در قالب شاخص TSR) به‌مقدار تراشهٔ آسفالت و سیمان مصرفی وابسته است؛ لذا با افزایش TSR مقدار تراشهٔ آسفالت کاهش و مقدار سیمان افزایش می‌یابد ولی هزینهٔ نهایی روسازی تغییر چندانی نمی‌کند. درواقع محدودهٔ جواب هزینهٔ حداقل اجرای روسازی، با محدودهٔ جواب روسازی بادوام دارای اشتراک می‌باشد و درصورت کاهش تراشهٔ آسفالت از ۲۹٫۶ به ۱۶ درصد و افزایش سیمان از ٤٫١٦ به ٦٫٣ درصد هزینهٔ اجرای روسازی با دوام خیلی کم تغییر می‌کند.

هنگام انتخاب طرح اختلاط مناسب باید به دسترس بودن مصالح تازه و تراشهٔ آسفالت توجه اکید شود. مطالعات انجام‌شده توسط سازمان‌های مختلف حمل‌ونقل آمریکا بیانگر این موضوع است که حداکثر درصد تراشهٔ آسفالت مناسب مخلوط‌های آسفالتی حدودا برابر با ۵۰٪ انتخاب شود.[31] [24] اهمیت این موضوع در تعداد تکرار محور استاندارد بالا، افزایش می‌یابد. درواقع ازآن-جایی‌که در روسازی حاوی قشر اساس تثبیت‌شده با سیمان نقش اصلی باربری روسازی به‌عهدهٔ قشر اساس است، با افزایش قابل‌توجه تکرار محور استاندارد عبوری از راه، ضخامت قشر اساس تثبیت‌شده نیز افزایش می‌یابد. این موضوع را می‌توان به‌وضوح در شکل (۷) یافت. به‌علاوه از شکل (۱۰) می‌توان نتیجه گرفت که شدت این افزایش ضخامت به ازای افزودن ۸۰٪ تراشهٔ آسفالت به مخلوط، نسبت‌به سایر موارد بیشتر است. ازآن‌جایی‌که افزایش ضخامت لایهٔ اساس تثبیت‌شده باعث افزایش هزینهٔ اجرا خواهد شد (تبدیل شدن از یک لایهٔ اساس به دو لایهٔ اساس در فرایند اجرا که هزینهٔ اجرایی را تقریبا دو برابر می‌کند)، پیشنهاد می‌شود که حداکثر میزان استفاده از تراشهٔ آسفالت به ۳۰٪ محدود شود.

نتیجه‌گیری

هدف از این مقاله به‌دست آوردن درصد تراشهٔ آسفالت و سیمان به‌منظور بهینه نمودن هزینهٔ اجرای مخلوط‌های اساس تثبیت‌شده با سیمان در اثر تردد بارمحوری استاندارد متغیر و با درنظر گرفتن دیدگاه دوام مخلوط بود. در این راستا تعدادی آزمایش‌های مقاومت فشاری مختلف انجام شد که نتیجهٔ آن دست‌یابی به یک رابطهٔ مناسب مقاومت فشاری برحسب درصد تراشهٔ آسفالت و سیمان بود به‌گونه‌ای که بتوان با کمک آن ضریب قشر و مدول ارتجاعی معادل قشر اساس تثبیت‌شده با سیمان را به‌دست آورد. در ادامه آزمایش‌های مقاومت کششی نیز در دو حالت مرطوب و خشک انجام گردید و از نتایج آزمایش‌های به‌عمل‌آمده، شاخص حساسیت رطوبتی (TSR) به‌عنوان معیاری برای دوام قشر اساس تثبیت‌شده با سیمان محاسبه شد. نهایتا براساس ضریب قشر معادل و مدول ارتجاعی قشر اساس تثبیت‌شده و مفروضات منطقی درمورد خصوصیات لایه‌های رویه و زیراساس، ضخامت روسازی حاوی اساس تثبیت‌شده با سیمان در اثر تردد بار محوری مختلف به‌دست آمد. در پایان معادلهٔ هزینه که هم‌زمان عامل دوام و هزینه‌ی اجرا را درنظر بگیرد تشکیل گردید. بر این اساس مهم‌ترین نتایج به‌شرح

زیر حاصل گردید:

تابع هزینهٔ به‌دست‌آمده در این تحقیق براساس فرضیاتی استوار است و اساسا در هر پروژه می‌بایست براساس الزامات اجرایی، فواصل حمل و قیمت روز مصالح یا فهرست‌بهای پایهٔ پیمان این معادله بازنویسی گردد.

از دو روش برای تعیین جواب بهینه در این تحقیق استفاده شد که نتیجهٔ هر دو روش بسیار به هم نزدیک است.

جواب بهینهٔ تابع هزینه در مقدار ۲۹,٦ درصد تراشهٔ آسفالت، ٤,١٦ درصد سیمان و در حداقل سطح بارگذاری حاصل شد که برای ۱۰ کیلومتر طول راه به‌عرض ٥,٥ متر (یک خط و شانه) براساس فهرست‌بهای پایهٔ پیمان موضوع مطالعهٔ حاضر و براساس شاخص دوام TSR=70 برابر ۳۰۸٦,۹۰۷ میلیون ریال تعیین شد. نتایج نشان داد که حداقل هزینه در حداقل سطح بارگذاری حاصل می-شود که کاملا بدیهی است.

نتیجهٔ بهینه‌سازی نشان داد درصورتی‌که حداقل بارگذاری را افزایش دهیم تنها تابع هزینه افزایش می‌یابد و تغییرات بارگذاری بر مقدار جواب بهینهٔ تراشهٔ آسفالت و سیمان اثرگذار نیست و این مورد در شکل (۹) قابل مشاهده است.

نتایج نشان داد در صورتی‌که شاخص TSR از ۷۰ به ۸۰ ارتقا یابد مقدار بهینهٔ تابع هزینه تغییری نمی‌کند و فقط مقدار بهینهٔ تراشهٔ آسفالت به ١٦ درصد کاهش می‌یابد و مقدار سیمان به ٦,۳ درصد افزایش می‌یابد.

به‌عنوان نتیجهٔ نهایی می‌توان پیشنهاد نمود در هر پروژه تثبیت لایهٔ اساس با سیمان حاوی تراشهٔ آسفالت باتوجه به شرایط پروژه، اهمیت آن و... سطح معیار دوامی تعیین گردد و بر این اساس مقادیر بهینهٔ تراشهٔ آسفالت و سیمان تعیین شوند به‌گونه‌ای که حداقل معیار دوامی برآورده شود و در ادامه باتوجه به سطح بارگذاری وارده، روسازی طراحی شود. نتایج این تحقیق نشان داد هزینهٔ طرح روسازی با این روش، هزینهٔ حداقلی خواهد بود.

تشکر و قدردانی

این پژوهش تحت حمایت مالی دانشگاه تربیت دبیر شهید رجائی طبق قرارداد شمارهٔ ۷۳٤۱ مورخ ١٤۰۰/۰٥/۲۳ انجام گردیده‌است.

مراجع

1. Taha, R., Ali, G., Basma, A. and Al-Turk, O., "Evaluation of Reclaimed Asphalt Pavement Aggregate in Road Bases and Subbases.", in *Transportation Research Records*, pp. 1652, Vol. 264–269, (1999).
2. R. Taha, "Evaluation of Cement Kiln Dust-stabilized Reclaimed Asphalt Pavement Aggregate Systems in Road Bases.", *in Transportation Research Records*, pp. 1819, Vol. 11-17, (2003).
3. M. Taha, R., Al-Harthy, A., Al-Shamsi, K. and Al-Zubeidi, "Cement Stabilization of Reclaimed Asphalt Pavement Aggregate for Road Bases and Subbases", *J. Mater. Civ. Eng.*, Vol. 14, No. 3, pp. 239–245, (2002).
4. C. H. Trzebiatowski, B.D., and Benson, "Saturated Hydraulic Conductivity of Compacted Recycled Asphalt Pavement", *Geotech. Test. J.*, Vol. 28, No. 5, pp. 1–6, (2005).
5. M. Adresi, A. Hassani, A. Khishdari, and M. Zeini, "Determination of Optimum Mix Design for Cement Treated Base Containing High Volume of Reclaimed Asphalt Pavement", *Transp. Infrastructures Eng. J.*, Vol. 3, No. 1, pp. 53–68, (2017).

6. Adresi, M., Ahmadi, A., and Rooholamini, H., "Influence of High Content of Reclaimed Asphalt on the Mechanical Properties of Cement-treated Base under Critical Environmental Conditions", *Int. J. Pavement Eng.*, Vol. 8436, No. October, pp. 1–8, (2017).
7. L. You, K. Yan, Y. Yue, and T. Yu, "Comparisons of Natural and Enhanced Asphalt Mixtures Containing Recycled Cement-Stabilized Macadam as Aggregates", *Am. Soc. Civ. Eng.*, Vol. 30, No. 34,pp. 502003, (2020).
8. Taylor, P., Alam, T. B., Abdelrahman, M., and Schram, S. A., "International Journal of Pavement Engineering Laboratory Characterisation of Recycled Asphalt Pavement as a Base Layer", *Int. J. Pavement Eng.*, Vol. 11, No. 2, pp. 37–41, (2010).
9. Faramarzi, M., Lee, K. W., Kim, Y., and Kwon, Y., "A Case Study on a Cement Treated RAP Containing Asphalt Emulsion and Acryl Polymer", *Case Stud. Constr. Mater.*, Vol. 9, pp. 1-25, (2018).
10. Faramarzi, M., Kim, Y., Kwon, S., and Lee, K.-W. W., "Evaluation of Cold Recycled Asphalt Mixture Treated with Portland Cement as Base-Layer Materials", *Am. Soc. Civ. Eng. Author*, Vol. 30, No. 73, pp. 502002, (2020).
11. Francois, A., Ali, A., and Mehta, Y., "Evaluating the Impact of Different Types of Stabilised Bases on the Overall Performance of Flexible Pavements", *Int. J. Pavement Eng.*, Vol. 8436, No. September, pp. 1–9, (2017).
12. Taha, R., Asce, A. M., Al-harthy, A., Al-shamsi, K., and Al-zubeidi, M., "Cement Stabilization of Reclaimed Asphalt Pavement Aggregate for Road Bases", *J. Mater. Civ. Eng.*, Vol. 1561, No. 14, pp. 239–245, (2002).
13. Faysal, M., *et al.*, "Determination of the Structural Coefficient of Different Combinations of Cement-Treated/Untreated Recycled Base Materials", in *Geotechnical and Structural Engineering Congress*, pp. 1198–1208, (2016).
14. Abdo, F. Y., "Cement-stabilized Base Courses-concrete Airport Pavement Workshop", (2009).
15. ARRA, "Asphalt Recycling and Reclaiming Association, Basic asphalt recycling manual," (2001).
16. Ayar, P., "Effects of Additives on the Mechanical Performance in Recycled Mixtures with Bitumen Emulsion: an Overview", *Constr. Build. Mater.*, Vol. 178, pp.551-561, (2018).
17. ASTMD2172/D2172M-17e1, "ASTM D2172 / D2172M-17e1, Standard Test Methods for Quantitative Extraction of Asphalt Binder from Asphalt Mixtures, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017, www.astm.org", (2017).
18. ASTMD5/D5M-19a, "Standard Test Method for Penetration of Bituminous Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2019, www.astm.org", (2019).
19. ASTMC29/C29M-16, "Standard Test Method for Bulk Density (‘Unit Weight’) and Voids in Aggregate", (2016).

20. ASTMD1633/D1633M, "Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates", *Am. Soc. Test. Mater.*, (2014).
21. ASTMD1557-12e1, "Tandard Test Methods for Laboratory Compaction Characteristics of Soil Using Modified Effort (56,000 ft-lbf/ft3 (2,700 kN-m/m3))", *Am. Soc. Test. Mater.*, (2012).
22. ASTMD1633-00, "Standard Test Methods for Compressive Strength of Molded Soil-Cement Cylinders", *Am. Soc. Test. Mater.*, (2007).
23. ASTM C496/C496M-11, "Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens", *Am. Soc. Test. Mater.*, (2004).
24. Xiao, F., Yao, S., Wang, J., Li, X., and Amirkhanian, S., "A literature Review on Cold Recycling Technology of Asphalt Pavement", *Constr. Build. Mater.*, Vol. 180, pp. 579–604, (2018).
25. Stimilli, A., Ferrotti, G., Graziani, A., and Canestrari, F., "Performance Evaluation of a Cold- recycled Mixture Containing High Percentage of Reclaimed Asphalt", *Road Mater. Pavement Des.*, Vol. 14, No. S1, pp. 149–161, (2013).
26. AASHTO, "Mechanistic– Empirical Pavement Design Guide A Manual of Practice", (2008).
27. "The Ministry of Roads and Urban Development", "Iran Highway Asphalt Paving Code No. 234", (2011).
28. Newcomb, D. E., Brown, E. R., and Epps, J. A., "Designing HMA Mixtures with High RAP Content A Practical Guide", (2007).
29. Mary Stroup-Gardiner and Tanya Wattenberg-Komas, "Recycled Materials and Byproducts in Highway Applications Volume 6: Reclaimed Asphalt Pavement, Recycled Concrete Aggregate, and Construction Demolition Waste", (2013).
30. "AASHTO T 283, RESISTANCE OF COMPACTED ASPHALT MIXTURES TO MOISTURE-INDUCED DAMAGE", (2014).
31. Taha, R., Asce, A. M., Al-harthy, A., Al-shamsi, K., and Al-zubeidi M., "C Cement Stabilization of Reclaimed Asphalt Pavement Aggregate for Road Bases and Subbases", *J. Mater. Civ. Eng.*, Vol. 1561, No. September 2015, (2002).